

# 海带漂烫-盐渍加工过程中碘形态含量变化规律

赵茹月<sup>1,2</sup>, 于源<sup>2</sup>, 张雅婷<sup>2</sup>, 蒋永毅<sup>3</sup>, 刘小芳<sup>2</sup>, 郭莹莹<sup>2</sup>, 苗钧魁<sup>2,\*</sup>, 冷凯良<sup>2,4,\*</sup>

(1.中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2.中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 青岛市极地渔业资源开发工程研究中心, 山东 青岛 266071; 3.青岛菲优特检测有限公司, 山东 青岛 266111; 4.崂山实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 通过测定漂烫水、漂洗水、盐渍水以及剩余海带中碘离子( $I^-$ )、碘酸根( $IO_3^-$ )、一碘酪氨酸(mono-iodotyrosine, MIT)和二碘酪氨酸(diiodotyrosine, DIT) 4种碘形态的含量, 研究海带漂烫-漂洗-盐渍过程中碘形态的溶出规律。鲜海带、漂烫海带、一次漂洗海带和二次漂洗海带 $I^-$ 含量在1 689.41~8 753.24 mg/kg,  $IO_3^-$ 含量在42.67~442.00 mg/kg之间, MIT和DIT含量分别在698.22~861.90 mg/kg和123.97~158.67 mg/kg之间。其中漂烫过程 $I^-$ 、MIT和DIT溶出率最高, 分别为(64.38±2.99)%、(19.35±0.97)%和(6.55±0.53)%。随着海带加入量的增大, 除漂烫水的DIT外, 所有水体中 $I^-$ 、MIT和DIT含量整体上呈先增大后趋于平稳的趋势, 所有水体中 $IO_3^-$ 含量均呈上升趋势。随海带漂烫颗数增加,  $I^-$ 溶出率先降低后基本保持不变, 与鲜海带相比, 第1颗盐渍海带的 $I^-$ 含量降低(80.72±2.66)%, 碘主要以 $I^-$ 的形式释放到水体中, 并且在漂烫过程中释放量最大。

**关键词:** 海带; 碘形态; 漂烫; 漂洗; 盐渍

## Variation in Contents of Iodine Species in Kelp during Blanching-Salting Process

ZHAO Ruyue<sup>1,2</sup>, YU Yuan<sup>2</sup>, ZHANG Yating<sup>2</sup>, JIANG Yongyi<sup>3</sup>, LIU Xiaofang<sup>2</sup>, GUO Yingying<sup>2</sup>, MIAO Junkui<sup>2,\*</sup>, LENG Kailiang<sup>2,4,\*</sup>  
(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Marine Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao Engineering Research Center of Polar Fishery Resources Exploitation, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Qingdao Feiyoute Testing Co. Ltd., Qingdao 266111, China; 4. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** In this study, the contents of four iodine forms, including iodide ion ( $I^-$ ), iodate ( $IO_3^-$ ), mono-iodotyrosine (MIT) and diiodotyrosine (DIT), were determined in the blanching water, rinsing water, saline water and processed kelp to study the dissolution patterns of iodine forms during the blanching, rinsing and salting of kelp. The  $I^-$  contents in fresh, blanched, primarily rinsed and secondarily rinsed kelp were 1 689.41–8 753.24 mg/kg, and the contents of  $IO_3^-$  ranged from 42.67 to 442.00 mg/kg. The contents of MIT and DIT ranged from 698.22 to 861.90 mg/kg and 123.97 to 158.67 mg/kg, respectively. During the blanching process, the dissolution rates of  $I^-$ , MIT and DIT were the highest, which were (64.38 ± 2.99)%, (19.35 ± 0.97)% and (6.55 ± 0.53)%, respectively. With increasing kelp addition, the contents of  $I^-$ , MIT and DIT in the blanching, rinsing and saline water first increased and then leveled off, and the content of  $IO_3^-$  in all waters showed a monotonously increasing trend. With increasing number of kelp rinsed, the dissolution rate of  $I^-$  decreased first and then basically remained unchanged. Compared with fresh kelp, the dissolution rate of  $I^-$  in the first rinsed kelp decreased by (80.72 ± 2.66)%, and iodine was released into water mainly in the form of  $I^-$ , with the maximum release being recorded during the blanching process.

**Keywords:** kelp; iodine species; blanching; rinsing; salting

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221213-136

中图分类号: TS254.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 01-0075-07

收稿日期: 2022-12-13

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作研究项目(32061133008); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-50)

第一作者简介: 赵茹月(1996—)(ORCID: 0000-0002-4835-4719), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 2628720183@qq.com

\*通信作者简介: 苗钧魁(1983—)(ORCID: 0000-0001-7081-5828), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为水产品加工与综合利用。E-mail: miaojk@ysfri.ac.cn

冷凯良(1966—)(ORCID: 0000-0003-3362-9705), 男, 研究员, 学士, 研究方向为水产品加工与质量安全。

E-mail: lengkl@ysfri.ac.cn

引文格式:

赵茹月, 于源, 张雅婷, 等. 海带漂烫-盐渍加工过程中碘形态含量变化规律[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 75-81.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221213-136. <http://www.spkx.net.cn>

ZHAO Ruyue, YU Yuan, ZHANG Yating, et al. Variation in contents of iodine species in kelp during blanching-salting process[J]. Food Science, 2024, 45(1): 75-81. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221213-136.

<http://www.spkx.net.cn>

海带是一种优质的食物来源, 含有丰富的生物活性物质, 如必需氨基酸、多不饱和脂肪酸、酚类化合物、抗氧化组分等<sup>[1-4]</sup>。目前我国海带产业已经形成了从大规模养殖生产、加工到应用的完整产业链条, 养殖加工规模居世界首位。根据中国渔业统计年鉴数据, 2020年中国海域养殖海带的年收获量为1 000万 t (鲜质量计)<sup>[5]</sup>。海带含有大量碘元素<sup>[6-9]</sup>, 含量高达6 500 mg/kg (干质量计)<sup>[10]</sup>。海带中的碘分为无机碘和有机碘两种形式<sup>[11]</sup>, 无机碘包括碘离子 ( $I^-$ )、碘酸根离子 ( $IO_3^-$ ); 有机碘包括一碘酪氨酸 (mono-iodotyrosine, MIT)、二碘酪氨酸 (diiodotyrosine, DIT)、蛋白质碘等<sup>[12]</sup>。

碘属于人体必需的微量元素之一, 具有促进代谢, 增强糖分、脂肪、蛋白质等营养物质的转化利用和保持垂体的活跃平衡等重要生理功能。碘与甲状腺激素的合成密切相关, 碘摄入不足可导致甲状腺功能改变, 如甲状腺肿、甲状腺功能减退和儿童克汀病症<sup>[13]</sup>。然而, 过量摄入还可能导致甲状腺机能亢进等疾病的出现, 表现为代谢率增加、紧张和兴奋、甲状腺癌等<sup>[14]</sup>。有研究表明, 长期碘酸钾过量会导致大鼠甲状腺处于亚临床损伤状态, 明显影响甲状腺的健康。此外, 长期过量摄入无机碘会引起甲状腺内各种激素的含量失衡<sup>[15]</sup>, 也会对甲状腺结构造成越来越严重的破坏<sup>[16-18]</sup>。而相比于无机碘, 有机碘具有高稳定性、高吸收率、低毒性的特点<sup>[19]</sup>, 即使在270 °C的高温下加热2 h也不会挥发。同时, 有机碘的人体吸收率为无机碘的2~3倍, 在急性和慢性毒理实验中均表现出无毒的特点<sup>[20-21]</sup>。

海藻食品中碘含量过高是主要的安全风险因素, 因此海藻加工过程中碘元素变化规律受到研究者的广泛关注。Pierrick等<sup>[22]</sup>发现将糖海带在32 °C的水中浸泡1~6 h后, 碘含量可显著降低84%~88%。Klaus等<sup>[23]</sup>研究发现, 煮沸2 min和20 min的糖海带的碘含量分别降低了33%和75%。Udo等<sup>[24]</sup>研究了在收获、洗涤、干燥72 h, 再浸泡24 h, 煮沸20 min后的红藻、褐藻和绿藻中的碘变化含量情况, 结果显示, 洗涤和干燥几乎不影响 $I^-$ 水平, 但浸泡和烹饪可使 $I^-$ 含量降低75%。我国海带产业发展迅速, 海带食品加工以盐渍海带加工为主<sup>[25-26]</sup>。蒋鹏等<sup>[27]</sup>通过跟踪测定漂烫水、漂洗水、剩余海带中的碘含量, 研究了鲜海带漂烫-漂洗过程中碘的溶出规律。实验结果表明, 漂烫水、漂洗水中的碘质量浓度随海带的加

入量增加均先增大后趋于稳定, 在鲜海带加入量为3 kg/L时更换漂烫、漂洗水, 可将海带中碘资源的利用率提升至46%。Cecilie等<sup>[28]</sup>将糖海带进行漂烫的研究结果表明, 将海带进行45~80 °C的漂烫处理, 可将海带中碘含量降低92%~94%。但是目前对于海带加工过程中碘元素变化规律的研究仅仅针对 $I^-$ 含量的变化, 而对于不同形态碘元素的含量变化规律研究较少。而有机碘与无机碘相比具有更高的食用安全性, 因此通过研究有机碘在海带加工过程中的含量变化情况, 可以更准确全面反映总碘在海带加工中的含量变化情况。

相比于前人研究工作中以单一 $I^-$ 含量代替总碘的测定方法, 本实验采用高效液相色谱-紫外测定了海带模拟加工各环节藻体和水中4种碘 ( $I^-$ 、 $IO_3^-$ 、MIT和DIT) 的含量, 阐明了不同碘在海带加工过程中的分布变化规律, 以期提升总碘含量测定的准确性, 也为海带食品品质控制与食用安全性相关研究提供理论支撑。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

鲜海带 (日本真海带 *Lamania japonica*) 山东荣成爱莲湾水产养殖有限公司; 无水磷酸二氢钾 天津市光复精细化工研究所; 碘离子标准品、碘酸钾标准品、25%四甲基氢氧化铵 (tetramethylammonium hydroxide, TMAH)、亚硫酸钠、磷酸、氯化钠 国药集团化学试剂有限公司; MIT标准品、DIT标准品 上海安普实验科技股份有限公司; 甲醇 (色谱纯) 德国Merck公司; 盐酸 (分析纯) 天津市风船化学试剂科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

BAS224S-CW型电子天平 赛多利斯 (北京) 科学仪器有限公司; SHA-B型恒温振荡器 常州智博瑞仪器制造有限公司; Neofuge 15R型高速冷冻离心机 上海力申科学仪器有限公司; LC-16高效液相色谱仪 (配有紫外检测器) 日本岛津公司; UV1102II型紫外-可见分光光度计 上海天美科学仪器有限公司; MD 200型氮吹仪 杭州奥盛仪器有限公司; KM-XWY-2型涡旋混匀器 宁波科麦仪器有限公司; RS-FS150型粉碎机 合肥荣事达小家电有限公司; DHG-9073B5-III型电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 海带采样处理

海带样品于2021年7月初采自山东荣成海域,采用系统抽样法从当地工厂当天采集的海带中抽取12颗能代表整体海带的样品,装袋后于4 h内带回实验室进行处理。海带自袋内取出后清理干净其表面海藻碎块、泥沙、贝类等杂物,处理完成后称量。

#### 1.3.2 海带加工处理

盐渍海带加工过程(图1):在恒温水浴锅加入准确称量的3 kg水,加入100 g NaCl,充分溶解,模拟海水。加热至90 ℃,依次放入海带样品进行漂烫,漂烫时间2 min。取漂烫水样100 mL置于具塞瓶内待测,并向水浴锅中补充100 mL去离子水。待水温回升至90 ℃再进行下一颗漂烫。漂烫后海带样品捞出,充分沥水,取样。取两个塑料桶标号,分别加入准确称量的3 kg水,加入100 g NaCl,充分溶解,模拟海水。依次放入海带样品进行漂洗,漂洗时间2 min。取水样100 mL置于具塞瓶内待测,并向桶中补充100 mL去离子水。漂洗后海带样品捞出,充分沥水,取样。漂洗后海带样品装到自封袋中,按质量20%添加NaCl,充分摇匀,室温放置48 h,模拟盐渍过程。盐渍结束后,盐渍海带样品和盐渍水分别取样。



图1 海带加工过程及取样

Fig. 1 Processing and sampling pointing of kelp

#### 1.3.3 海带取样

取样时要将海带平铺,按照等距法分为4部分,每部分各取左右两侧宽2 cm,长度包含海带边缘到中心的海带条,每颗海带共计取样8小块。取得的海带样品称质量后放入样品袋内,于-20 ℃条件下冷冻保存。实验前将样品在室温下解冻,称取一定质量于40 ℃恒温干燥箱中干燥至质量恒定,干燥后的海带用粉碎机充分研磨成粉状颗粒,然后用100目不锈钢筛进行筛分,用于后续实验。

#### 1.3.4 海带及水样碘形态测定

碘形态测定方法采用高效液相色谱法<sup>[29]</sup>,色谱条件: Waters XTerra MS C<sub>18</sub>色谱柱(150 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相: A为甲醇, B为50 mmol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (0.1%磷酸)溶液; 梯度洗脱程序: 0~3 min, 5% A、95% B; 3~5 min, 5%~30% A、95%~70% B; 5~10 min, 30% A、70% B; 10~15 min, 40% A、60% B; 15~16 min, 40%~5% A、60%~95% B; 16~20 min, 5% A、95% B; 流速: 1.0 mL/min; 进样量: 10 μL; 检测波长: 225 nm; 柱温箱温度: 27 ℃。

海带样品用5% TMAH溶液进行处理,提取各形态碘,具体操作:称取试样0.10 g于50 mL的耐110 ℃塑料离心管中,加入5 mL 5% TMAH提取液,涡旋1 min,使

样品充分分散均匀,充氮,旋紧盖子,置于(80±5) ℃水浴摇床提取3 h,冷却,以5 000 r/min转速离心5 min,收集上层清液于50 mL离心管中,加入适量蒸馏水冲洗沉淀,离心后并入上清液,加水定容至20 mL。吸取1 mL海带提取液过0.2 μm微孔滤膜过滤后上机测定。吸取0.5 mL海带提取液加入0.25 mL 0.1 mol/L的亚硫酸钠溶液和0.25 mL 1 mol/L的HCl溶液,避光反应10 min,过0.22 μm微孔滤膜过滤后上机测定。

#### 1.4 数据统计及图表绘制方法

实验结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用Microcal Origin (Version 8.5)和Excel 2003进行数据分析和图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 海带在漂烫-盐渍加工过程中碘形态含量变化

对第1颗海带在漂烫-盐渍各过程中的I<sup>-</sup>、IO<sub>3</sub><sup>-</sup>、MIT和DIT含量进行测定,如图2所示,鲜海带、漂烫海带、一次漂洗海带、二次漂洗海带和盐渍海带总碘含量分别为(9 816.48±286.31)、(4 534.32±102.66)、(3 284.18±46.97)、(2 832.30±43.20) mg/kg和(2 687.63±40.58) mg/kg。鲜海带中I<sup>-</sup>含量最高(8 753.24±291.64) mg/kg,占总碘含量的(89.17±2.65)%, IO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量最低,仅占(0.43±0.02)%, MIT和DIT含量占比分别为(8.78±0.51)%和(1.62±0.06)%。因此,海带中的碘主要以I<sup>-</sup>形式存在<sup>[24]</sup>,有机碘仅占10%左右。Udo等<sup>[6]</sup>用高效液相色谱法测定了不同种类海藻及其不同部位总碘含量,其中海带各部位总碘含量在3 340~10 203 mg/kg,与本研究结果一致。经漂烫、一次漂洗、二次漂洗以及盐渍过程,海带中I<sup>-</sup>含量逐渐降低,分别为(8 753.24±291.64)、(3 258.50±48.93)、(2 117.04±62.57)、(1 720.56±48.05) mg/kg和(1 689.41±59.95) mg/kg,在对海带进行漂烫、漂洗、盐渍的过程中,I<sup>-</sup>会进入到漂烫、漂洗及盐渍水中,并且在漂烫过程溶出率最高。Cecilie等<sup>[28]</sup>的研究结果表明将海带进行45~80 ℃的漂烫处理,可将海带中碘含量降低92%~94%,至约300~400 μg/g。在各加工阶段海带中,漂烫海带中IO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量最高(442.00±21.99) mg/kg,其次为一次漂洗海带(328.09±21.63) mg/kg、盐渍海带(297.66±16.97) mg/kg和二次漂洗海带(281.35±14.01) mg/kg,鲜海带中IO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量最低(42.67±2.68) mg/kg,此现象可能与海带中的成分因漂烫、漂洗等处理引发的相互作用有关。刘崑等<sup>[30]</sup>利用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定紫菜中碘形态时,发现实验过程中IO<sub>3</sub><sup>-</sup>转化为I<sup>-</sup>,认为可能是样品本身某些成分造成了无机碘之间的转化。在

漂烫-盐渍过程中MIT和DIT含量变化不明显,分别在698.22~861.90 mg/kg和123.97~158.67 mg/kg,这说明MIT和DIT性质比较稳定,在加工过程中不易溶于漂烫、漂洗水中。

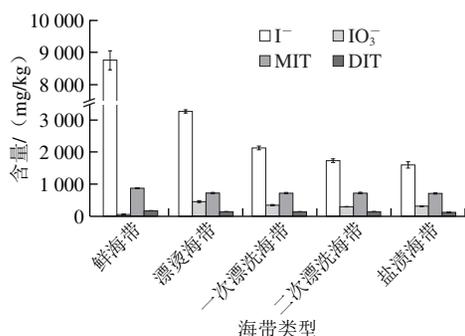


图2 第1颗海带漂烫-盐渍加工过程碘形态含量

Fig. 2 Contents of four forms of iodine in the first kelp during blanching and salting

## 2.2 海带漂烫-盐渍加工过程水体中碘形态含量变化

对第1颗海带在漂烫-盐渍各过程水体中的 $I^-$ 、 $IO_3^-$ 、MIT和DIT质量浓度进行测定,结果如图3所示。漂烫水中 $I^-$ 质量浓度最高(303.16±6.58 mg/L),其次为一次漂洗水(55.32±2.06 mg/L)、二次漂洗水(22.94±0.18 mg/L)和盐渍水(22.85±0.11 mg/L)。蒋鹏等<sup>[27]</sup>对单颗海带进行漂烫-漂洗,并采用滴定法测定海带及水体中碘含量,结果为漂烫水中最多,一次漂洗水其次,二次漂洗水和剩余海带最少,这与本研究结果一致。只在漂烫水和一次漂洗水中检测到了 $IO_3^-$ ,漂烫水中 $IO_3^-$ 质量浓度为(10.86±0.48) mg/L,一次漂洗水中为(4.27±0.21) mg/L。MIT只在漂烫水和盐渍水中检测到,质量浓度分别为(8.58±0.74) mg/L和(5.74±0.31) mg/L。DIT只在漂烫水中检测到,质量浓度为(2.10±0.10) mg/L。

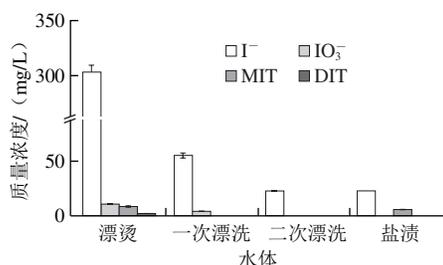


图3 第1颗海带漂烫-盐渍加工过程水体中碘形态含量

Fig. 3 Contents of four forms of iodine in waters during the blanching and salting of the first kelp

## 2.3 漂烫-盐渍加工过程中海带碘形态溶出率

按照海带的漂烫次序,依次用每颗海带漂烫、漂洗以及盐渍后水体中的碘含量除以海带内的总碘含量,可得当颗海带碘的溶出率。表1显示了第1颗海带在漂烫、一次漂洗、二次漂洗和盐渍过程中 $I^-$ 、 $IO_3^-$ 、MIT和DIT

的溶出率,从表1可以看出,在海带各个加工过程中 $I^-$ 溶出率分别为(64.38±2.99)%、(13.04±0.84)%、(5.68±0.41)%和(0.67±0.05)%,其中漂烫过程中 $I^-$ 溶出率最大,其次是一次漂洗过程、二次漂洗过程和盐渍过程。Ownsworth等<sup>[31]</sup>将干燥的海带漂烫10~20 s,可以使海带碘含量降低52%~82%。 $IO_3^-$ 在一次漂洗过程溶出率为(21.36±1.33)%,二次漂洗过程和盐渍过程未检测到 $IO_3^-$ 溶出。MIT和DIT含量在加工过程中变化不明显,在漂烫过程中有所溶出,溶出率分别为(19.35±0.97)%和(6.55±0.53)%。因此可以得出结论:海带在漂烫、一次漂洗、二次漂洗和盐渍过程中,碘主要是以 $I^-$ 的形式释放到水体中,并且在漂烫过程中释放量最大。因此测定了第6、12颗(海带加入量分别为8.48 kg和16.32 kg)海带在漂烫以及漂洗过程中 $I^-$ 溶出率,将漂烫过程碘的溶出率与漂洗过程碘的溶出率进行比较得到图4,观察漂烫曲线,海带中碘的溶出率最大值出现在第1颗海带处,可达到64.38%,随着海带加入量的增大, $I^-$ 溶出率呈逐渐降低趋势,其中海带加入量为8.48 kg和16.32 kg时,溶出率分别为(0.81±0.06)%和(-1.12±0.08)%,基本在0%上下浮动,说明此时水体中 $I^-$ 浓度与海带中 $I^-$ 含量达到平衡状态。蒋鹏等<sup>[27]</sup>将鲜海带经过漂烫后碘的提取率与经过漂烫-漂洗全过程处理后碘的提取率进行比较,结果为海带中碘的提取率最大值出现在第1颗海带处,可达到63.36%,第6~12颗海带的提取率保持在0%附近,这与本研究结果基本一致。随着海带加入量的增大,漂洗过程 $I^-$ 溶出率与漂烫过程一致,均为逐渐降低的趋势,海带加入量为8.48 kg时, $I^-$ 溶出率与漂烫过程相比由0%左右增长到10%左右,到16.32 kg时, $I^-$ 溶出率维持在0%附近,此时漂洗水和海带中 $I^-$ 迁移达到了平衡。

表1 海带漂烫盐渍加工过程中4种形态碘溶出率(以干基计, n=3)  
Table 1 Dissolution rates of four forms of iodine from kelp during blanching and salting (n=3)

加工过程	$I^-$	$IO_3^-$	MIT	DIT
漂烫	64.38±2.99	—	19.35±0.97	6.55±0.53
一次漂洗	13.04±0.84	21.36±1.33	0	0
二次漂洗	5.68±0.41	0	0	0
盐渍	0.67±0.05	0	1.67±0.14	0

注:—无法对 $IO_3^-$ 溶出率进行计算。

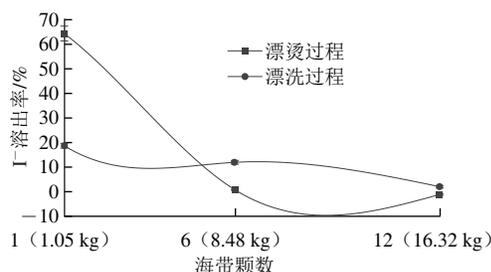


图4  $I^-$ 溶出率随海带加入量的变化

Fig. 4 Changes in dissolution rate of  $I^-$  with increasing kelp addition

### 2.4 水体中碘形态含量随海带加入量的变化

如图5所示,第1、6、12颗海带漂烫-盐渍加工过程水体中 $I^-$ 质量浓度最高的均为漂烫水,分别为 $(303.165 \pm 6.58)$ 、 $(743.36 \pm 4.52)$ 、 $(761.54 \pm 5.47)$  mg/L,其次是一次漂洗水 $(55.32 \sim 550.69)$  mg/L、二次漂洗水 $(22.94 \sim 466.88)$  mg/L和盐渍水 $(22.85 \sim 532.00)$  mg/L;随着海带加入量的增大, $I^-$ 质量浓度呈先增大后趋于平稳的趋势,从第1颗(海带加入量1.05 kg)到第6颗海带(海带加入量8.48 kg), $I^-$ 质量浓度急速升高,从第6颗海带之后, $I^-$ 质量浓度变化范围非常小,走势趋于平缓(图5A),原因是在对第1颗海带进行漂烫漂洗等操作时,碘是由海带向水中溶解的过程为主的,然而随着水中碘质量浓度的不断增加,到第6颗时海带和水中的碘质量浓度越来越趋于一个平衡,海带中的碘向水中释放的速率变慢<sup>[27]</sup>。随着海带加入量的增加,所有水体中 $IO_3^-$ 质量浓度都表现出上升的趋势,其中上升幅度最大的是漂烫水 $(10.86 \sim 357.02)$  mg/L和盐渍水 $(0 \sim 269.55)$  mg/L,一次漂洗水和二次漂洗水 $IO_3^-$ 的质量浓度上升幅度较小,分别为 $4.27 \sim 192.89$  mg/L和 $0 \sim 127.94$  mg/L。在海带加入6颗以上时(海带加入量8.48 kg),漂烫水的 $IO_3^-$ 质量浓度上升趋势变缓,盐渍水的 $IO_3^-$ 质量浓度趋于稳定,而二次漂洗水中的 $IO_3^-$ 质量浓度上升幅度增大。一次漂洗水的 $IO_3^-$ 质量浓度一直保持稳定上升的趋势(图5B)。第1、6、12颗海带漂烫-盐渍加工过程水体中MIT质量浓度最高的仍为漂烫水,质量浓度在 $8.58 \sim 27.96$  mg/L,其次是盐渍水 $(5.74 \sim 10.44)$  mg/L、一次漂洗水 $(0 \sim 8.55)$  mg/L和二次漂洗水 $(0 \sim 6.16)$  mg/L;除盐渍水外,随着海带加入量的增大,其余3种水体中MIT质量浓度均呈先增大后减小的趋势,从第1颗到第6颗海带(即海带加入量从1.05~8.48 kg,下同),MIT质量浓度逐渐升高,从第6颗到第12颗海带(海带加入量从8.48~16.32 kg),MIT质量浓度略微降低,但变化幅度较小,而盐渍水中MIT质量浓度随着海带加入量的增大始终处于增大的趋势(图5C)。第1、6、12颗海带加工水体中漂烫水DIT质量浓度最高,质量浓度在 $1.48 \sim 2.75$  mg/L之间,其次是盐渍水 $(0 \sim 0.96)$  mg/L、一次漂洗水 $(0 \sim 0.79)$  mg/L和二次漂洗水 $(0 \sim 0.61)$  mg/L;除漂烫水外,其他水的DIT质量浓度随着海带加入量的增大而增大,从第1颗到第6颗海带,DIT质量浓度增大趋势明显,第6颗海带之后,DIT质量浓度变化走势趋于平缓(图5D)。

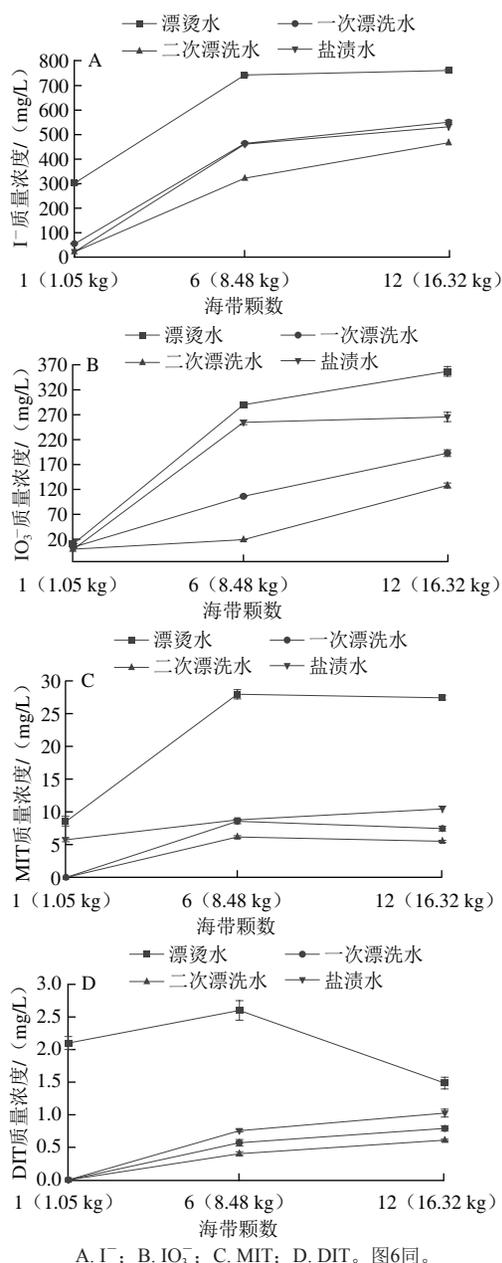


图5 漂烫-盐渍海带加工过程水体中碘形态含量随海带加入量的变化  
 Fig. 5 Changes in iodine contents in waters during blanching and salting with increasing kelp addition

### 2.5 盐渍海带碘含量随海带加入量的变化

按照海带漂烫次序,分别测定第1、6颗和第12颗(即海带加入量分别1.05、8.48 kg和16.32 kg时,下同)海带原始碘形态含量与盐渍碘形态含量,如图6所示,3颗盐渍海带 $I^-$ 含量均小于原始海带 $I^-$ 含量, $I^-$ 含量分别下降了 $(80.72 \pm 2.66)\%$ 、 $(76.14 \pm 2.84)\%$ 和 $(78.21 \pm 2.15)\%$ ;随着海带漂烫颗数的增加, $I^-$ 溶出率先降低后基本保持不变,第1颗海带溶出率最大;DIT趋势与 $I^-$ 相同;与 $I^-$ 相反,3颗盐渍海带 $IO_3^-$ 含量与未处理海带相比均有所升高,尤以第6颗海带最为显著,随着漂烫颗数的增加,溶出率呈先升高后降低的趋

势; MIT含量经盐渍后含量均有所下降, 这与 $I^-$ 和DIT趋势相近, 但随着海带漂烫颗数的增加, MIT溶出率逐渐降低, 与原始海带相比, 第1、6颗和第12颗海带MIT含量分别下降 $(17.29 \pm 0.86)\%$ 、 $(13.51 \pm 0.52)\%$ 和 $(9.85 \pm 0.54)\%$ 。为进一步降低海带碘含量, 及时更换漂烫水和漂洗水是一种较为合理的方式<sup>[27]</sup>。

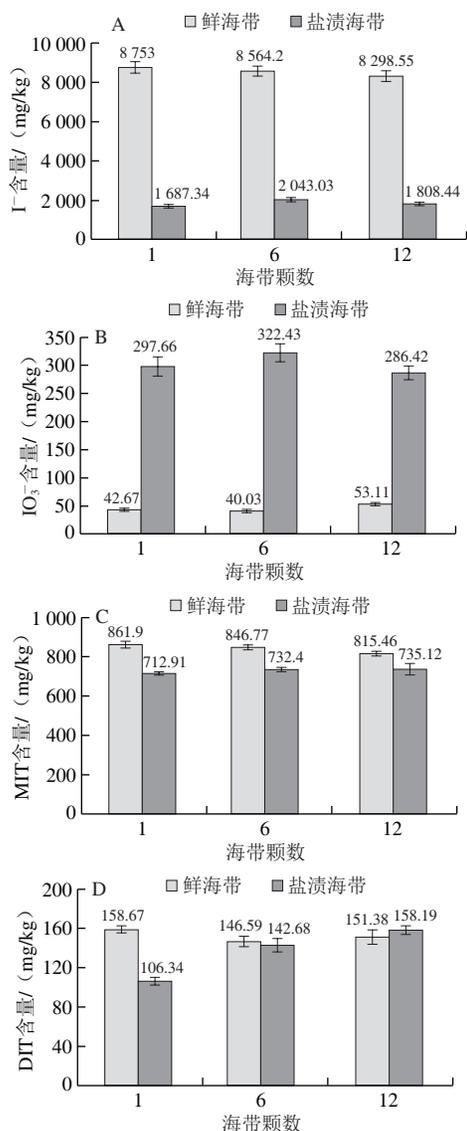


图6 盐渍海带碘含量随海带加入量的变化

Fig. 6 Changes in iodine contents in salted kelp with increasing kelp addition

### 3 结论

通过测定海带在漂烫、漂洗和盐渍过程中4种碘形态含量变化情况, 可知在加工过程中, 除 $IO_3^-$ 之外, 其余几种碘形态含量均有所下降, 其中 $I^-$ 溶出率高达 $(80.72 \pm 2.66)\%$ , 对加工过程水体中4种碘形态含量进行测定, 发现除 $IO_3^-$ 之外,  $I^-$ 、MIT和DIT均在漂烫过程中溶出率最高, 尤以 $I^-$ 最为明显, 可达64.38%, 一次漂

洗过程中仅有 $I^-$ 和 $IO_3^-$ 溶出, 二次漂洗过程仅有 $I^-$ 溶出, 盐渍过程仅有MIT溶出。将漂烫过程 $I^-$ 的溶出率与漂洗过程碘的溶出率进行比较可知, 随着海带加入量的增大, 两种加工过程 $I^-$ 溶出率均呈逐渐降低的趋势, 在海带加入量为8.48 kg时, 漂烫过程 $I^-$ 迁移已达到平衡状态, 但漂洗过程 $I^-$ 迁移过程还未达到平衡。通过测定漂烫水、一次漂洗水、二次漂洗水以及盐渍水中 $I^-$ 、 $IO_3^-$ 、MIT和DIT随海带加入量增大的变化趋势可以看出, 随着海带加入量的增大, 水体中 $I^-$ 、MIT和DIT含量呈先增大后趋于平稳的趋势, 所有水体中 $IO_3^-$ 含量都表现出上升的趋势。

通过研究海带在漂烫、漂洗和盐渍过程中4种碘形态含量迁移变化情况, 可知海带中的碘主要是以 $I^-$ 的形式释放到水体中, 并且在漂烫过程中释放量最大。4种碘溶出率为: $I^- > IO_3^- > MIT > DIT$ 。随着海带加入量的增大, 水体与海带中碘含量迁移会慢慢达到平衡, 延长漂洗过程可使 $I^-$ 溶出率增大, 延缓 $I^-$ 达到平衡的时间。

### 参考文献:

- [1] KNAPP G, MAICHINA B, FECHER P, et al. Iodine determination in biological materials options for sample preparation and final determination[J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1998, 362(6): 508-513. DOI:10.1007/s002160051116.
- [2] HERNÁIZ M, GALINDO P, GARCÍA M P, et al. Direct quantification of inorganic iodine in seawater by mixed-mode liquid chromatography-electrospray ionization-mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2018, 1588: 99-107. DOI:10.1016/j.chroma.2018.12.046.
- [3] GONZÁLEZ A, PAZ S, RUBIO C, et al. Human exposure to iodine from the consumption of edible seaweeds[J]. Biological Trace Element Research, 2019, 197(2): 361-366. DOI:10.1007/s12011-019-01996-w.
- [4] URD G, CECILIE W, GONÇALO S, et al. The seasonal variation in nitrogen, amino acid, protein and nitrogen-to-protein conversion factors of commercially cultivated Faroese *Saccharina latissima*[J]. Algal Research, 2019, 42. DOI:10.1016/j.algal.2019.101576.
- [5] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴[J]. 世界农业, 2020, 491(3): 2.
- [6] UDO N, DAGMAR B S. A new HPLC method for the detection of iodine applied to natural samples of edible seaweeds and commercial seaweed food products[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 326-334. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.030.
- [7] 谷怡静. 海带生物脱腥及多糖提取、抗氧化应用[D]. 无锡: 江南大学, 2022. DOI:10.27169/d.cnki.gwqgu.2022.000266.
- [8] 王雨馨, 郭莹莹, 李娜, 等. 加工方式对海带营养品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8229-8234. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2020.22.015.
- [9] 宋武林. 海带的主要功能及加工利用研究现状[J]. 渔业研究, 2016, 38(1): 81-86. DOI:10.14012/j.cnki.fjsc.2016.01.012.
- [10] PIERRICK S, ERLAND I, ADALHEIDUR Ó, et al. Effects of drying on the nutrient content and physico-chemical and sensory characteristics of the edible kelp *Saccharina latissima*[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 30(4): 2587-2599. DOI:10.1007/s10811-018-1451-0.
- [11] VANESSA R, PILAR B, JORGE M, et al. Speciation of the bio-available iodine and bromine forms in edible seaweed by high performance liquid chromatography hyphenated with inductively

- coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 745: 24-32. DOI:10.1016/j.aca.2012.07.035.
- [12] 王雨馨, 郭莹莹, 赵芸, 等. 海藻有机碘检测方法的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(5): 1424-1430. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2020.05.012.
- [13] XU H, CAO L H, CHENG H Y. Determination of iodine species in seaweed and seawater samples using ion-pair reversed phase high performance liquid chromatography coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Analytical Methods*, 2012, 4(10): 3471-3477. DOI:10.1039/C2AY25871D.
- [14] SORAYA P, CARMEN R, INMACULADA F, et al. Toxic metals (Al, Cd, Pb and Hg) in the most consumed edible seaweeds in Europe[J]. *Chemosphere*, 2019, 218: 879-884. DOI:10.1016/j.chemosphere.2018.11.165.
- [15] SAYESS R, EYRING A M, RECKHOW D A. Source and drinking water organic and total iodine and correlation with water quality parameters[J]. *Water Research*, 2021, 190: 116686. DOI:10.1016/j.watres.2020.116686.
- [16] HANSOL D, MIN H L, HYUN J P. Effect of different cooking methods on the content and bioaccessibility of iodine components in abalone (*Haliotis Discus Dannai*)[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301(C): 125197. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125197.
- [17] VANESSA R, PILAR B, ANTONIO M. Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis for iodinated amino acid extraction from edible seaweed before reversed-phase high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, 1309: 33-40. DOI:10.1016/j.chroma.2013.08.022.
- [18] MICHAEL Y R, JORUNN S, HÉLÈNE M, et al. Iodine content in bulk biomass of wild-harvested and cultivated edible seaweeds: inherent variations determine species-specific daily allowable consumption[J]. *Food Chemistry*, 2018, 254: 333-339. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.02.024.
- [19] 邹晓燕, 蔺新英, 陈兆堂, 等. 有机碘和无机碘对人甲状腺细胞凋亡的影响[J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(2): 120-123. DOI:10.16241/j.cnki.1001-5914.2013.02.028.
- [20] INGIBJÖRG G, LISBETH D. Iodine intake in human nutrition: a systematic literature review[J]. *Food & Nutrition Research*, 2012, 56: 19731. DOI:10.3402/fnr.v56i0.19731.
- [21] MONIKA S, RODOLFO G W, SASI S K, et al. Iodine speciation studies in commercially available seaweed by coupling different chromatographic techniques with UV and ICP-MS detection[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2005, 20(3): 176-182. DOI:10.1039/b415756g.
- [22] PIERRICK S, HÉLÈNE M, ARNE D, et al. Biomass soaking treatments to reduce potentially undesirable compounds in the edible seaweeds sugar kelp (*Saccharina latissima*) and winged kelp (*Alaria esculenta*) and health risk estimation for human consumption[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2018, 30(3): 2047-2060. DOI:10.1007/s10811-017-1343-8.
- [23] KLAUS L, LEIV M. European aquaculture of sugar kelp (*Saccharina latissima*) for food industries: iodine content and epiphytic animals as major problems[J]. *Botanica Marina*, 2015, 58(6): 449-455. DOI:10.1515/bot-2015-0036.
- [24] UDO N, DAGMAR B S. Quantification of iodine loss in edible Irish seaweeds during processing[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(6): 3527-3533. DOI:10.1007/s10811-016-0868-6.
- [25] 翁祖桐. 福建海带产业发展形势分析[J]. *中国水产*, 2018(12): 75-78.
- [26] 国家藻类产业技术体系. 海带产业发展报告[J]. *中国水产*, 2021, 549(8): 23-41.
- [27] 蒋鹏, 苗钧魁, 冷凯良, 等. 鲜海带漂烫过程中碘的溶出规律[J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 48-52. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201417010.
- [28] CECILIE W N, SUSAN L H, JENS J S, et al. Reducing the high iodine content of *Saccharina latissima* and improving the profile of other valuable compounds by water blanching[J]. *Foods*, 2020, 9(5): 569. DOI:10.3390/foods9050569.
- [29] 赵茹月, 苗钧魁, 刘小芳, 等. 基于还原法的海带中4种碘形态高效液相测定方法[C]//中国营养学会第十五届全国营养科学大会论文汇编, 2022: 896. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.034388.
- [30] 刘威, 曹蔚然, 胡俊栋, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定紫菜中的碘形态[J]. *分析试验室*, 2017, 35(9): 1028-1031. DOI:10.13595/j.cnki.issn1000-0720.2017.0221.
- [31] OWNSWORTH E, SELBY D, OTTLEY J, et al. Tracing the natural and anthropogenic influence on the trace elemental chemistry of estuarine macroalgae and the implications for human consumption[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 259-272. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.05.263.